

Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela

Methodology for the generation of a model map for ubication of threats of landslides in the river Camurí Grande, in the state Vargas, Venezuela

Scarleth Mujica (1)

scmujica@usb.ve

Henry Pacheco (2)

henrypacheco@gmail.com

(1) Departamento de Formación General y Ciencias Básicas, Universidad Simón Bolívar, Sede del Litoral, Venezuela

(2) Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Caracas, Venezuela

Recibido en mayo de 2013 y publicado en septiembre 2013

RESUMEN

Los deslizamientos representan un problema para la población asentada en áreas de vertiente, aumentan la vulnerabilidad y pueden afectar la infraestructura, los bienes y la vida. El objetivo es proponer una metodología para el diseño de un modelo de amenaza por deslizamientos, aplicado a la cuenca del río Camurí Grande, Estado Vargas, Venezuela, considerando variables de susceptibilidad como geología, pendiente, geomorfología, vegetación y conflicto de uso del espacio; y las variables desencadenantes de precipitación y sísmica. Se plantea el procedimiento de la Evaluación Espacial Multicriterio, con elementos de la metodología costarricense Mora-Vahrson para clasificar la amenaza por deslizamientos, así como el uso del instrumento Matriz de Jerarquización Analítica e indagaciones teóricas, para la asignación del peso ponderado de las variables y el cruce de mapas, con apoyo de un Sistema de Información

Geográfica. Estos modelos son de suma importancia para la Gestión de Riesgos, en las políticas de prevención.

Palabras clave: *Amenaza; deslizamientos; modelo; Camurí Grande; Venezuela*

ABSTRACT

The landslides are a problem for the population in areas of slope, increase vulnerability and can affect infrastructure, property and life. The principal main is to propose a methodology for the design of a model of threat for landslides, applied to the river Camuri Grande, State Vargas, Venezuela, whereas variables of susceptibility as geology, slope, geomorphology, vegetation and space use conflict; and the inducing variables of rainfall and seismic. There is a procedure of the "Spatial Evaluation Multicriterion", with elements of the Costa Rican methodology Mora-Vahrson to classify the threat by landslides, as well as the use of the instrument Matrix of Analytical Classification and theoretical investigations, for the assignment of the weight weighted of the variables and the crossing of the maps, with support of a system of Geographical information. These models are of supreme importance for the management of risks, in prevention policies.

Key words: *Threat; Landslides; Model; Camurí Grande; Venezuela*

INTRODUCCIÓN

El objetivo es brindar una propuesta metodológica para la generación de modelos de amenaza por procesos de remoción en masa. Esta metodología toma en cuenta la Evaluación Espacial Multicriterio como técnica para considerar simultáneamente todas las variables y el método costarricense Mora-Vahrson para clasificar la amenaza por deslizamientos, con ajustes particulares de acuerdo a las características del área de estudio y la información disponible; haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica, como tecnología informática de punta, dentro de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (TIC), para el manejo de información espacial y de esa forma, contribuir en la resolución

de problemas complejos de planificación territorial y construir futuros más seguros.

La temática está estrechamente relacionada con la gestión de riesgo ambiental, por lo que resulta de gran interés para la ciencia, el Estado, los planificadores, las instituciones y la población en general, ya que las repercusiones que en los últimos años han tenido sobre el país la ocurrencia de fenómenos naturales como las lluvias extremas, combinadas con un alto nivel de vulnerabilidad en la población, han dejado trágicas consecuencias como pérdidas de vidas humanas y económicas, que colocan a muchas familias en una situación de riesgo; lo que genera en consecuencia, un grave problema para el Estado y la sociedad. Por estos motivos, en la actualidad se hace imprescindible contar con herramientas que contribuyan con la gestión de riesgo ambiental, tal como la representación cartográfica del riesgo, para precisar espacialmente el peligro y tomar acciones en consecuencia.

El área, considerada como referencia para la aplicación del modelo metodológico lo constituye la cuenca del río Camurí Grande, ubicada en la vertiente norte de la Cordillera de la Costa, al Este del pico Naiguatá, nace en el Topo Tacamahaco a los 2.200 m.s.n.m. como altura máxima, y desciende hasta los 0 m.s.n.m. en la vertiente Caribe, en la parte centro norte de Venezuela (figura 1). Con una superficie de 67,62 Km², de esa extensión, la cuenca abarca 42,46 Km². Este sector pertenece a la Parroquia Naiguatá, Municipio Vargas, Estado Vargas, Venezuela. Específicamente se ubica entre los 10° 32' y los 10° 38' de latitud Norte y entre los 66° 40' y los 66° 44' de longitud Oeste. En coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) entre los 1.166.000 y 1.176.000 m. Norte, y entre los 748.000 y 755.000 m. Oeste (figura 1), de acuerdo a las hojas 6847-I-SO de Carupao y 6847-I-NO de Naiguatá, Venezuela; mapas topográficos del Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales Renovables y la Dirección de Cartografía Nacional del año 1975.

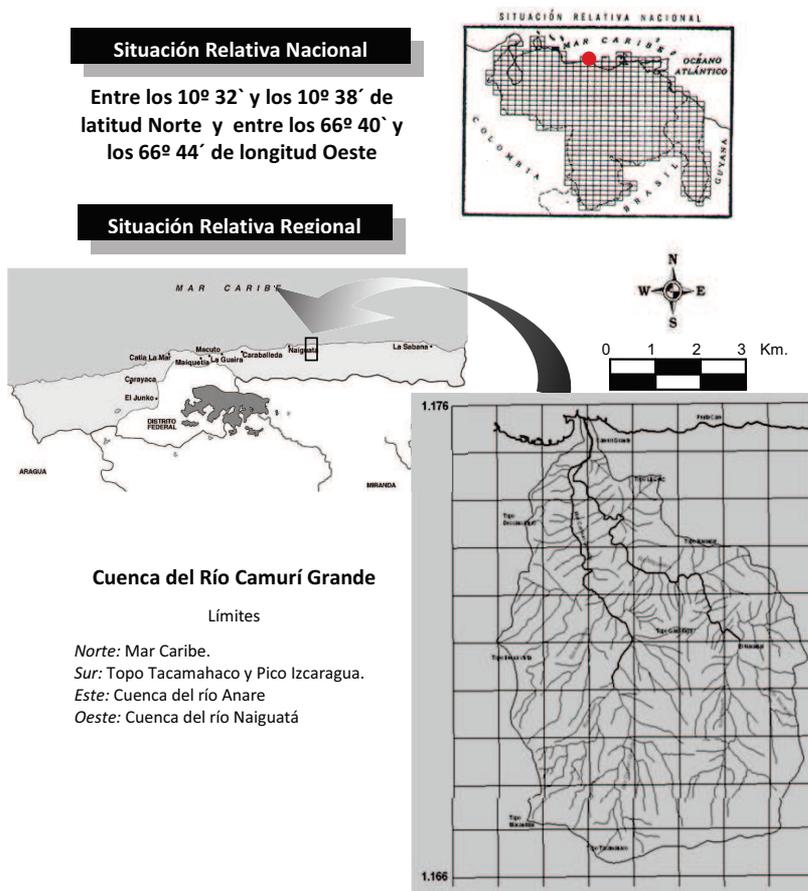


Figura 1. Localización del área de estudio. Elaboración propia con datos tomados del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales "Productor". (2003). **Proyecto Ávila.** [multimedia CD - Rom]. Caracas: Corporación Andina de Fomento. Mapas topográficos del Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales Renovables y la Dirección de Cartografía Nacional del año 1975, hojas 6847-I-SO de Carupao y 6847-I-NO de Naiguatá, Venezuela.

La cuenca en su parte alta y media se encuentra despoblada, sin embargo, la cuenca baja (cono de deyección) se encuentra poblada por un número importante de habitantes, dicho poblado lleva el mismo nombre del río Camurí Grande, de unas 100 ha., al Este de la población

de Naiguatá, a unos 1,2 Km de distancia. Esta área pertenece al Sistema Montañosos de la Costa, región con alta densidad poblacional, desde el punto de vista geológico de mucha complejidad e inestabilidad, ya que es una zona tectónicamente activa, con la presencia de importantes fallas, convirtiéndose esta variable en un componente detonante que intensifica la amenaza, aunado a la presencia de torrentes que responden rápidamente a precipitaciones, que en algunos casos no son tan extremas. Este sistema fue uno de los que se activaron hidromorfodinámicamente en los eventos de precipitaciones excepcionales de diciembre de 1999 y febrero de 2005, afectando seriamente a la población y la infraestructura presente en la zona. A los elementos geológicos, climáticos e hidrográficos del área, se le suma la confluencia de una serie de factores socio-ambientales, asociados con la presencia humana, que actúan de forma negativa sobre el equilibrio del paisaje y la dinámica natural de su evolución.

MÉTODO

Investigación de campo, conocida también como investigación sobre el terreno, de tipo explicativa, donde el investigador en algunas situaciones no puede manipular directamente las variables, ya que no es posible el control y manejo absoluto de las mismas. En consecuencia, a este tipo de variables se le pueden denominar atributivas, sin embargo, de acuerdo con Ávila (2006), por medio de ellas es posible comprobar hipótesis, establecer relaciones de causa y efecto, utilizar métodos estadísticos para el tratamiento y análisis de datos, estudiando de manera retrospectiva el fenómeno en cuestión, pero siendo posible realizar predicciones o pronósticos, con base en la estadística.

La zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por procesos de remoción en masa, ha sido elaborada mediante los procedimientos de la Evaluación Espacial Multicriterio (EEM), como método de análisis y toma de decisiones, integrándolo con una base de datos cartográficos en un Sistema de Información Geográfica (SIG), manejados con el programa Mapinfo Professional 9.0 y el módulo Vertical Mapper. Esta EEM, ha sido utilizada por varios autores para este tipo de evaluaciones referidas a la susceptibilidad y la amenaza, en Venezuela, por ejemplo, destaca el trabajo

de Roa (2007) sobre la estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales en la cuenca del río Mocotíes del Estado Mérida. Así mismo la EEM también ha sido combinada con la utilización de la tecnología de los SIG, aunque el reto debe ser mayor frente a las necesidades requeridas para el país.

La Evaluación Espacial Multicriterio, de acuerdo a Barredo, 1996 (citado por De Cos Guerra, 2007), es definida como un “conjunto de operaciones espaciales para lograr un objetivo teniendo en consideración simultáneamente todas las variables que intervienen” (s/p). Por otro lado, Gómez y Baredo (citado por Roa, 2007), las definen como “un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de tomas de decisiones, mediante la descripción, ordenación, jerarquización y selección de alternativas de acuerdo a ciertos postulados, los cuales a su vez dependen de los objetivos plantados” (p. 184).

En relación con el objetivo planteado, se consideraron una serie de factores que pueden estar involucrados en la generación de procesos de remoción en masa, tales como, la geología de superficie, la pendiente del terreno, la geomorfología, la vegetación, el conflicto de uso del espacio, la distribución temporal de las precipitaciones y la variable sísmica a través de las fallas tectónicas y contactos litológicos, a los que se les denomina lineamientos. Estos factores constituyen las variables, y cada una de ellas ha sido ponderada de acuerdo al método de las jerarquías analíticas, a juicio de expertos y a una sustentación teórica, que determinaría su proclividad a generar procesos de remoción en masa.

Toda la información cartográfica extraída de diversas fuentes que se citarán más adelante en cada variable, se ha manipulado de forma digitalizada, mediante el Sistema de Información Geográfica, trabajando con el programa Mapinfo Professional y el módulo Vertical Mapper para lo relacionado con altimetrías y superposición de mapas. La georeferenciación de las imágenes se ha hecho utilizando la proyección de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) en SAD 69, re proyectando el sistema de referencias que establece el Sistema Geodésico Nacional (Datum Oficial) Red Geocéntrica de Venezuela GRS-80 (REGVEN), de

acuerdo a la Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional (2000), en la presentación de los mapas los resultados se expresan en km. En el caso de las imágenes JPG se convirtieron en imágenes raster y luego vectoriales, y la proyección se realizó manualmente seleccionando puntos sobre la imagen para introducir los datos en el sistema.

Luego, las variables mencionadas fueron utilizadas para crear los mapas de susceptibilidad y amenaza como modelos, superponiéndolos mediante una suma ponderada, lo que generaría dos modelos finales, uno de amenaza por actividad sísmica y otro de amenaza por precipitaciones. En el proceso ha sido necesario hacer una reclasificación de las fuentes en atributos, convirtiéndolos de vector a raster, y cada elemento con la asignación de un valor en una escala del 1 al 5, que indica su proclividad a los deslizamientos (figura 2).

La suma ponderada está dada por el peso o grado de influencia de cada variable en porcentaje, de acuerdo a su propensión a generar procesos de remoción en masa, empleando el método estadístico multivariado, con una aproximación semicuantitativa. Cada capa fue cruzada a través del álgebra de mapas, considerando la columna de pesos ponderados obtenidos de la matriz de jerarquización analítica. El algoritmo utilizado fue el siguiente:

$$\text{Susceptibilidad} = \frac{((\text{Geología}\%) + (\text{Pendiente}\%) + (\text{Geomorfología}\%) + (\text{Vegetación}\%) + (\text{Conflicto de uso}\%))}{5}$$

Introduciendo en el sistema los siguientes datos:

$$\text{Susceptibilidad} = \frac{((\text{Grid1} * 0,30) + (\text{Grid2} * 0,30) + (\text{Grid3} * 0,20) + (\text{Grid4} * 0,10) + (\text{Grid5} * 0,10))}{5}$$

En donde:

Grid1 = Geología

Grid 4 = Vegetación

Grid 2 = Pendiente del terreno

Grid 5 = Conflicto de uso

Grid 3 = Geomorfología

Luego de obtener este mapa, se procedió a superponer las variables desencadenantes para la obtención de la amenaza, mediante una suma sencilla:

- a) Amenaza por precipitaciones = Susceptibilidad + Precipitaciones
- b) Amenaza por sismos = Susceptibilidad + Áreas de influencia de lineamientos

Finalmente, para la calibración de esos modelos, se tomó en cuenta el registro espacial del evento de alud torrencial ocurrido en Vargas en el año 1999, mediante una imagen de satélite LANDSAT TM+ de abril de 2000, como un importante indicador que demuestra las áreas deslizadas, y que se dibujaron como polígonos, para medir con exactitud en cada variable, cuáles fueron los elementos donde ocurrieron mayores deslizamientos y de esa forma contrastarlo con el modelo propuesto. Los resultados se expresan en medidas de superficie por Km² y luego en porcentajes.

Para la determinación de los pesos dados a los criterios que intervienen en los procesos de remoción en masa, ya se mencionó que se ha propuesto la técnica de Evaluación Espacial Multicriterio, particularmente mediante el *Método de las Jerarquías Analíticas* (MJA) o Analytic Hierarchy Process (AHP) reportado por Saaty (2008).

Según Malczewski (citado por Gómez y Barredo, 2005), el procedimiento “Se basa en la descomposición, juicio comparativo y síntesis de las prioridades del problema de decisión”. En este caso, es la importancia relativa de un elemento dentro de la variable, para la generación de procesos de remoción en masa, “que a su vez son derivadas a partir de una evaluación de pares de concordancia o Pairwise, llamados así debido a que solo se permite el análisis de relación de un par de criterios a la vez”. (Roa, 2007). Estos criterios van a ser calificados o valorados, empleando la siguiente tabla (cuadro 1).

Cuadro 1. Tabla de Valoración para el Método de Jerarquías Analíticas

Nivel de Importancia	Definición	Descripción
1	Igual preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera a los proceso de remoción en masa.
2	Moderada preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el (j)
3	Fuerte preferencia	Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el (j) está demostrada.
4	Absoluta preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x).

Nota: datos tomados de Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48 (2), 183-219.

Por tanto, se requiere analizar la relación directa entre la variable ubicada en columnas y la variable ubicada en filas, rellenando con un número en la escala del 1 al 4, como se señala en el cuadro 1, el recuadro de intersección, que aparece disponible. Para este trabajo se manejaron resultados obtenidos de este instrumento que fue sometido a consulta a cuarenta y siete (47) expertos, de los cuales respondieron ocho (8), por tanto, los pesos asignados a la capa de geología, geomorfología, vegetación y al mapa de susceptibilidad dependieron del juicio de expertos, de acuerdo a las características del área y su conocimiento sobre la misma.

Se asume como principal referencia el método Mora – Vahrson (Mora, 2004) con ciertas consideraciones. Este método es elaborado en Costa Rica, por Mora y Wilhelm-Guenther Vahrson, constituye una importante referencia para clasificar la amenaza por deslizamientos, o lo que se denomina “movimientos de remoción en masa”, y ha sido ampliamente utilizado, principalmente en Centroamérica. Sin embargo, éste sólo va a constituir una referencia para los modelos de susceptibilidad y amenaza, en la escala de valores que proponen, ya que ofrece una clasificación que va del 1 al 5, utilizando calificativos que van desde el

nivel de susceptibilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, con sus respectivas características (cuadro 2). Se considera válido utilizar esta clasificación para los modelos de amenaza final.

Cuadro 2. Clasificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento Propuesto por Mora (2004)

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Características
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables...Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Nota. Datos tomados de Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del Cantón San José, Provincia de San José, Costa Rica. (Artículo en Línea) Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, Escuela Centroamericana de Geología y Universidad de Costa Rica. Disponible en: http://www.femica.org/areas/modambiental/archivos/foro/deslizamiento_canton_san_jose.pdf . [Consulta: 2009, Junio 15].

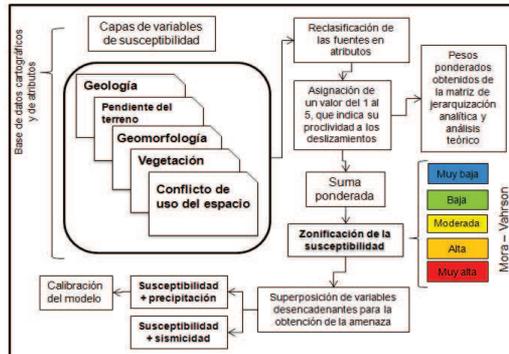


Figura 2. Diagrama metodológico de procesamiento de información. Elaboración propia.

Metodología Específica en cada Capa Temática

Geología

Para la asignación de valores a esta variable, se manejan los resultados obtenidos del instrumento de Matriz de Jerarquización Analítica. La elaboración de esta capa temática requirió un mapa geológico a escala 1:25.000, del Proyecto Ávila (Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales “Productor”. (2003) en la versión digital como imagen; así como el del Plan de Ordenamiento Territorial (2005), en coordenadas UTM, ofrecido por CORPOVARGAS en archivos del programa ArcView, que debieron ser importados a Mapinfo Professional. Luego de trabajarlo a detalle, se obtuvo una capa de la variable con las características referidas en el cuadro 3 y la figura 3.

Pendiente del terreno

Salazar (2007), propone una clasificación de la pendiente para adaptarla al método Mora-Vahrson, esta clasificación por su caracterización se consideró en sus rasgos generales, para luego asignar los valores de peso a cada rango de variable producto de un análisis de pendiente. Ella inicia

con el tipo de pendiente plano, luego inclinación suave, donde se dan los movimientos de masa de baja velocidad; seguidamente las pendientes inclinadas, con peligro severo de la erosión del suelo; continua un moderado escarpado, donde pueden ocurrir movimientos de masa de todo tipo y hay peligro de erosión y de deslizamiento del suelo; posteriormente el escarpado, donde pueden darse procesos intensivos como la erosión bajo la cubierta del bosque, reptación y deslizamientos, con peligro extremo de la erosión del suelo. Luego el terreno muy escarpado, con afloramientos de roca, depósitos finos e incoherentes de talud cayendo de la cara libre de roca y finalmente, el extremadamente escarpado, con mayor peligro.

Para elaborar esta capa temática se utilizó como principal referencia el mapa de curvas de nivel ofrecido por CORPOVARGAS, del Plan de Ordenamiento Territorial. Fueron diseñados dos mapas, un Modelo Digital de Elevación, de gran utilidad para la caracterización morfométrica de la cuenca, elaboración de perfiles topográficos, entre otros; y el mapa de pendientes del terreno, con los rangos que fueron derivados de un procesos de análisis de pendiente, donde se procedió a elaborar perfiles transversales y longitudinales, dividiendo la distancia vertical entre la horizontal en varios puntos de cada perfil, expresando visualmente los resultados en porcentajes y grados, aunque se decide trabajar los valores de pendiente en grados. Luego, a ello se le aplicaron algunos estadísticos como suma, media, desviación estándar, valores máximos y valores mínimos, estos cálculos tuvieron la finalidad de obtener el rango de pendiente más apropiado y el número de clases, para aplicarlo en el procedimiento de elaboración del mapa de pendiente. Luego de los resultados del análisis de pendiente, se clasificó el mapa en seis (6) clases de rangos de pendientes asignándoles peso del 1 al 5 de acuerdo a su proclividad a generar deslizamientos. Se obtuvo una capa de la variable con las características reportadas en el cuadro 4 y la figura 4.

Geomorfología

La determinación del peso de los atributos de esta variable, en torno a su proclividad a generar procesos de remoción en masa, al igual que las

variables de geología y vegetación, se manejaron los resultados obtenidos del instrumento de matriz de jerarquización analítica, por lo que los pesos asignados a la capa de geomorfología, dependieron del juicio de expertos, de acuerdo a las características del área y el conocimiento que éstos tienen sobre la misma. En tal sentido, se empleó como mapa base el mapa geomorfológico a escala 1:25.000, del Proyecto Ávila (Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales “Productor”, 2003, en la versión digital como imagen, así como el del Plan de Ordenamiento Territorial, que luego de su procesamiento digital, se logró una capa de la variable con las características que se describen en el cuadro 5 y la figura 5.

Vegetación

Márquez (citado por Rivera, s/f), menciona que “El efecto de refuerzo mecánico impartido por las raíces, se relaciona con la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial, ya que se mejora ampliamente el valor de la cohesión”. Asimismo, las raíces proporcionan un anclaje que refuerza y contrarresta la gravedad de las pendientes, “y el peso de la vegetación ejerce sobre el suelo una componente vertical que aumenta la carga normal y por consiguiente la resistencia al deslizamiento.”

Según Waldron, 1977 (citado por Rivera, s/f),

Este efecto de la vegetación sobre la estabilidad del suelo se debe a que en los horizontes más superficiales, el sistema radical conforma una malla densa de fibras resistentes que refuerza la capa de suelo manteniéndola en el sitio, o uniéndola a materiales más estables, mientras la raíz pivotante actúa como un anclaje en forma de columna que evita el desplazamiento de los horizontes más profundos.

Sin embargo, ese peso de la vegetación en coberturas muy densas (en especial si se trata de árboles de gran altura) y pendientes muy fuertes, puede ser contraproducente y generar mayor propensión a los procesos de remoción en masa, por lo que esta consideración particular fue tomada

en cuenta para la asignación de valores a los atributos de esta variable, de acuerdo al juicio de expertos, en los resultados del instrumento de la Matriz de Jerarquización Analítica. Las características obtenidas para esta variable se evidencian en el cuadro 6 y la figura 6.

Conflicto de uso del espacio

Cartaya (2009), lo define como "...grado de conflicto o antagonismo entre el uso actual de un lugar y el uso potencial o el que se le debería dar en función de sus atributos naturales. Este criterio se calcula usando una técnica cualitativa" Su obtención fue posible luego de la elaboración de dos mapas, el de uso actual y el de uso potencial, para observar posteriormente las zonas de conflicto, y de acuerdo al grado de conflicto evidenciado, tanto en los mapas como en el campo, se otorgaron los valores en la escala del 1 al 5, ausencia de conflicto de uso, bajo conflicto, conflicto moderado, grado alto de conflicto y muy alto nivel de conflicto, en áreas donde se le da un uso no recomendado y se propone la recuperación del mismo, pero que en la realidad no se cumple, principalmente referido al asentamiento poblacional.

Para su elaboración se requirió de un mapa en escala 1:25.000, en archivo Autocad, del Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso del Área de Protección y Recuperación Ambiental del Estado Vargas (eje Arrecife-Los Caracas), otorgado en colaboración por el IERU (Instituto de Estudios Regionales y Urbanos de la Universidad Simón Bolívar). Se utilizó como base para la construcción de ambos mapas; el de uso actual demandó adicionalmente, chequeos en campo y vista a imagen satelital de Google Earth, para tener mayor exactitud en la definición de linderos. Se logró una capa de la variable con las características que se expresan en el cuadro 7 y la figura 7.

Precipitación

Se considera la variable precipitación como un desencadenante o factor externo, de acuerdo a lo que plantea el método de clasificación de

amenaza de Mora *et. al.* (2002), y va a ser tomada en cuenta para generar uno de los mapas de amenaza. Para la crear esta capa, se tomó como base un mapa de isoyetas elaborado por Zambrano (1970), que indica la precipitación media anual, luego se valida la información con datos obtenidos de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio como Macuto, Naiguatá, Los Caracas, Humboldt y USB-Camurí Grande. Los resultados extraídos corroboran la información obtenida del mapa de isoyetas, ya que los promedios están dentro de los intervalos ubicados en el área.

En los polígonos que se generan en el área de la cuenca de Camurí Grande, a partir de la digitalización de este mapa, utilizando el programa Mapinfo Professional, se pueden ubicar valores promedios de 700, 800, 900, 1000 y 1100 mm de precipitación. Este mapa de isoyetas sigue aproximadamente la topografía de la cordillera, estando los valores más bajos a nivel de la costa y los más altos de forma progresiva hacia la cumbre.

En el mapa las áreas más susceptibles a deslizamiento, son valoradas de acuerdo a los datos de la Precipitación Media Anual, asignándoles los valores más bajos a los rangos de menor precipitación, y los más altos, a los rangos de mayor precipitación por recomendación de expertos.

Adicionalmente, se tomó en cuenta el óptimo pluviométrico concepto que se refiere a la distribución vertical de la precipitación en zonas montañosas referido por H. Pacheco (entrevista personal, Abril 09, 2010), utilizando los datos de las estaciones de la cuenca de Galipán, cuyo óptimo pluviométrico es a partir de los 1500 m.s.n.m, a partir de este punto, se asigna a los polígonos el valor más elevado en la escala del 1 al 5 para indicar que las lluvias caídas a esta altura generan mayor contingencia en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, en la cuenca por encima de esa cota se ubicaron montos de más de 1000 mm de Precipitación Media Anual (PMA). Los atributos de la variable precipitación, en el mapa de isoyetas se definen en el cuadro 8 y la figura 8.

Sismicidad

Se empleó para esta capa temática el mapa geológico del sector de Naguayá, de la Universidad Central de Venezuela y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (2001), hoja de referencia 6847-I-NO, escala 1:25.000; el mapa geológico a escala 1:25.000, del Proyecto Ávila (2003) en la versión digital como imagen y el mapa geológico elaborado anteriormente por los autores, como base para contar con la misma georreferenciación utilizada hasta los momentos en coordenadas UTM. Se pudo evidenciar que muchas de las fallas siguen los lineamientos de los contactos litológicos. Luego de tener todas las líneas, con la ayuda del Mapinfo, se le aplicaron 3 áreas de influencia o los llamados buffer, el primero a una distancia de 500 metros, el segundo a 1000 metros y el tercero a 2000 metros, duplicando cada uno la distancia del anterior hasta cubrir toda el área de estudio. Los valores fueron asignados tomando en cuenta el criterio de que existe una alta probabilidad de que los procesos de remoción en masa puedan ocurrir en las adyacencias de estos lineamientos en caso de ocurrir un sismo, por tanto el mayor peso en ese sentido lo tendría la primera área de influencia a los 500 metros, y así sucesivamente. Se obtiene finalmente una capa de la variable con las características referidas en el cuadro 9 y la figura 9.

Construcción del mapa de Susceptibilidad

La susceptibilidad según Soldano (2008), “está referida a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico” (p. 2), este mapa muestra la disposición a que ocurra un proceso de remoción en masa, utilizando varias categorías que van desde muy baja, hasta muy alta (figura 10). Para la suma ponderada en el proceso de generación de la imagen raster de susceptibilidad, se trabaja en el programa Mapinfo Professional cada variable en el orden establecido de acuerdo a los resultados de los pesos relativos, tal como se describió anteriormente.

El modelo se calibró con un evento anteriormente ocurrido, para determinar el porcentaje de funcionalidad y generar mayor confianza en el mismo. Esta calibración se hizo superponiendo las variables tomadas

en cuenta para el mapa de susceptibilidad y el desencadenante de precipitaciones, con un mapa de deslizamientos del área de estudio, representando a un evento acaecido, específicamente el de lluvias extremas, ocurridas en diciembre de 1999, obtenidos de la imagen satelital LANDSAT TM+ de abril de 2000; de modo que se relacionaran la superficie de cada atributo en cada variable, con la superficie deslizada, representado en Km² y también en porcentajes, relativo al tamaño real de toda el área (cuadro 10 y figura 11).

Modelos de Amenaza

Mapa de amenaza a los procesos de remoción en masa por el desencadenante precipitaciones.

En este caso, tal como se planteo anteriormente, se suma la susceptibilidad con el desencadenante de precipitaciones, utilizando la capa de isoyetas. Con la herramienta del Vertical Mapper, se hace una suma sencilla para superponer las dos capas:

$$\text{Amenaza} = \text{Grid1} + \text{Grid2}$$

En donde:

$$\text{Grid1} = \text{Susceptibilidad} \quad \text{Grid2} = \text{Variable Precipitación}$$

El resultado se evidencia en la figura 12.

Mapa de amenaza a los procesos de remoción en masa por el desencadenante sísmico

Este modelo representa la probabilidad de que se generen procesos de remoción en masa, de ocurrir un sismo de fuerte magnitud. Se suma la susceptibilidad con el desencadenante sísmico, utilizando la capa de fallas tectónicas y contactos litológicos. Con la herramienta del Vertical Mapper, se hace una suma sencilla para superponer las dos capas:

$$\text{Amenaza} = \text{Grid1} + \text{Grid2}$$

En donde:

$$\text{Grid1} = \text{Susceptibilidad} \quad \text{Grid2} = \text{Variable Sísmica}$$

El resultado se evidencia en la figura 13.

RESULTADOS

Capas Temáticas

Geología

Cuadro 3. Variable Geología y sus Atributos en la capa temática

Variable	Atributos	Ponderación
Geología	Esquistos de Tacagua	5
	Aluvi3n Cuaternario	5
	Augengneis de Pe1a de Mora	5
	Asociaci3n Metam3rfica 1vila	4
	M1rmar de Antimano	3
	Serpentinita	3
	Meta-Tonalita de Caruao	2
	Meta-Granito de Naiguat1	2

Nota. Cuadro elaborado con caracter1sticas obtenidas del mapa geol3gico del Proyecto 1vila, del Instituto Geogr1fico de Venezuela Sim3n Bol1var y el Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales, 2003, Caracas; y los resultados de la aplicaci3n del instrumento de la Matriz de Jerarquizaci3n An1lica.

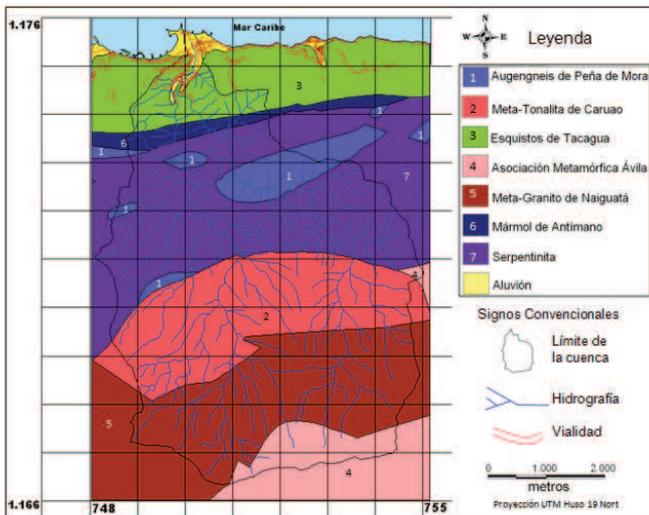


Figura 3. Mapa geol3gico de la cuenca del r1o Camur1 Grande

Pendiente del terreno

Cuadro 4. Clasificación de la pendiente del terreno y sus atributos en la capa Temática.

Variable	Atributos	Ponderación
Pendiente del terreno	0° - 8°	1
	8° - 16°	2
	16° - 24°	3
	24° - 32°	4
	32° - 40°	5
	> 40°	5

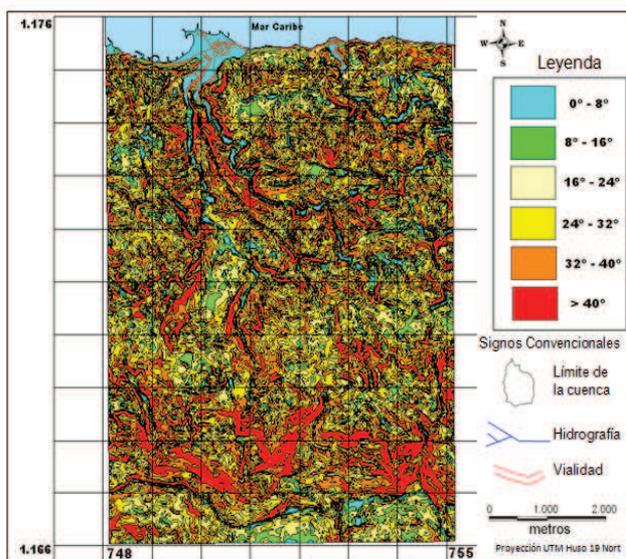


Figura 4. Mapa de pendiente del terreno, en la cuenca del río Camurí Grande.

Geomorfología

Cuadro 5. Geomorfología y sus atributos en la capa temática

Variable	Atributos	Ponderación
Geomorfología	Laderas	5
	Colinas	4
	Ladera Rocosa de Valle en V	5
	Viga	4
	Cima	3
	Lomas	4
	Lechos de Crecidas	2
	Cono de Deyección	2
	Playa y Cordón Arenogravoso	1

Nota. Cuadro elaborado con características obtenidas del mapa geomorfológico del Proyecto Ávila, del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y el Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales, 2003, Caracas; y los resultados de la aplicación del instrumento de la Matriz de Jerarquización Analítica.

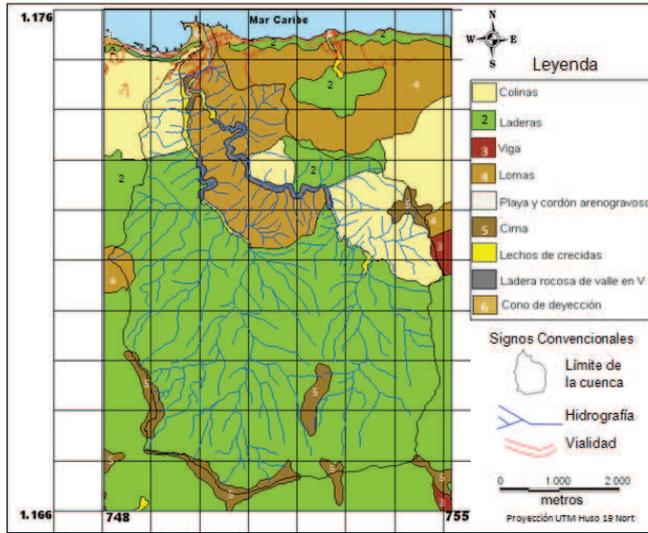


Figura 5. Mapa Geomorfológico de la cuenca del río Camurí Grande.

Vegetación

Cuadro 6. Variable vegetación y sus atributos en la capa temática.

Variable	Atributos	Ponderación
Vegetación	Bosques y espinares. Densa (>75% cubierto)	5
	Bosques, matorrales y espinares. Media (50–75% cubierto)	3
	Matorrales y bosques. Ralo (<50% cubierto)	5
	Ralo (Urbano)	1

Nota. Cuadro elaborado con características obtenidas del mapa de vegetación del Proyecto Ávila, del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar y el Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales, 2003, Caracas; y los resultados de la aplicación del instrumento de la Matriz de Jerarquización Analítica.

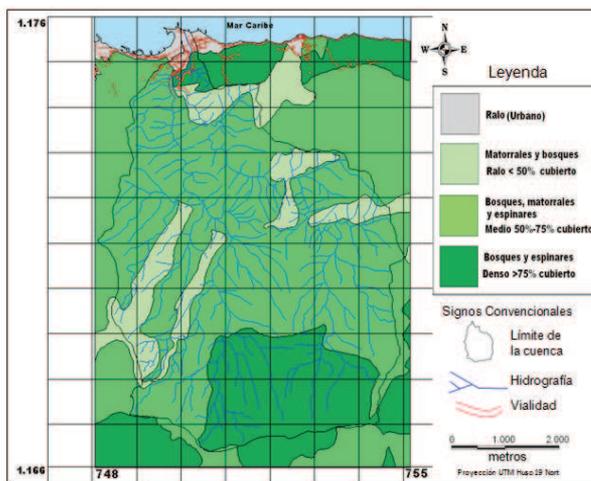


Figura 6. Mapa de vegetación de la cuenca del río Camurí Grande.

Conflicto de uso del espacio

Cuadro 7. Variable conflicto de uso del espacio y sus atributos en la capa temática

Variable	Atributos	Ponderación
Conflicto de Uso del espacio	Residencial Anárquico	5
	Residencial multifamiliar organizado	4
	Educativo (USB-Litoral)	4
	Recreacional (público y privado)	4
	ABRAE	1

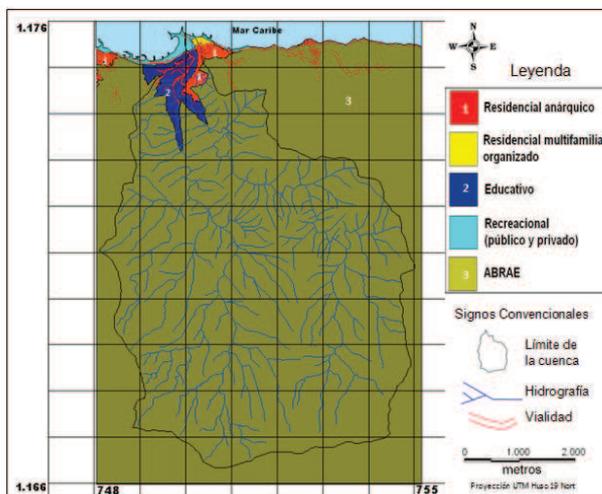


Figura 7. Mapa de uso del espacio en la cuenca del río Camurí Grande.

Precipitación

Cuadro 8. Variable precipitación y sus atributos en la capa temática

Variable	Atributos	Ponderación
Precipitación	700-800 mm PMA	2
	800-900 mm PMA	3
	900-1000 mm PMA	4
	1000-1100 mm PMA	5
	>1100 mm PMA	5

Nota. Cuadro elaborado con datos tomados de Zambrano, A. (1970).

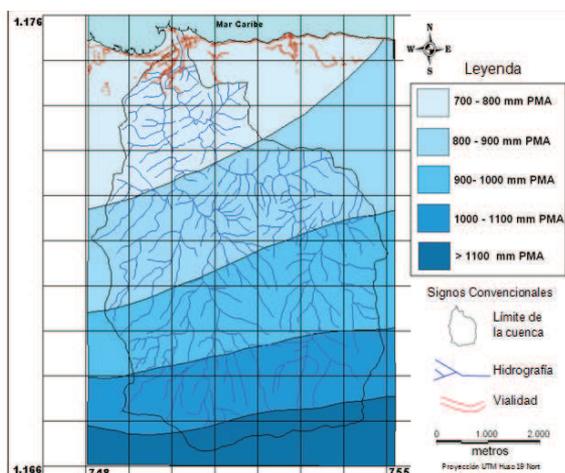


Figura 8. Mapa de Isoyetas de la cuenca de Camurí Grande.

Sismicidad

Cuadro 9. Variable Sismicidad y sus atributos en la capa temática.

Variable	Atributos	Ponderación
Sísmica	Influencia de 0 a 500 m. de la falla tectónica y/o contactos litológicos	5
	Influencia de 500 a 1000 m de la falla tectónica y/o contactos litológicos	4
	Influencia de 1000 a 2000 m de la falla tectónica y/o contactos litológicos	3

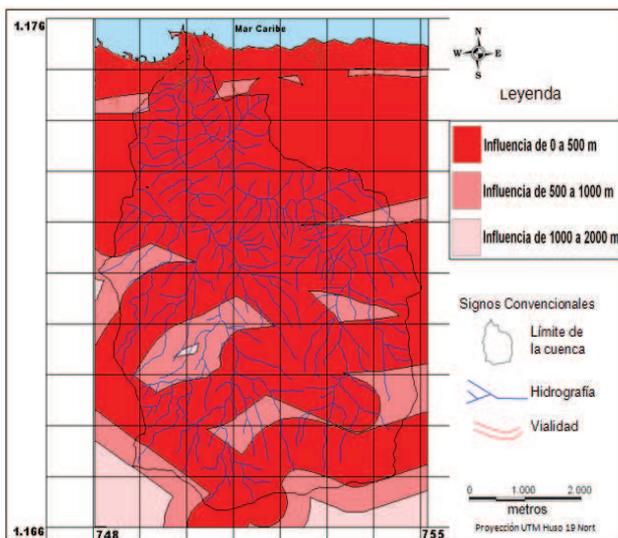


Figura 9. Mapa de fallas tectónicas y contactos litológicos.

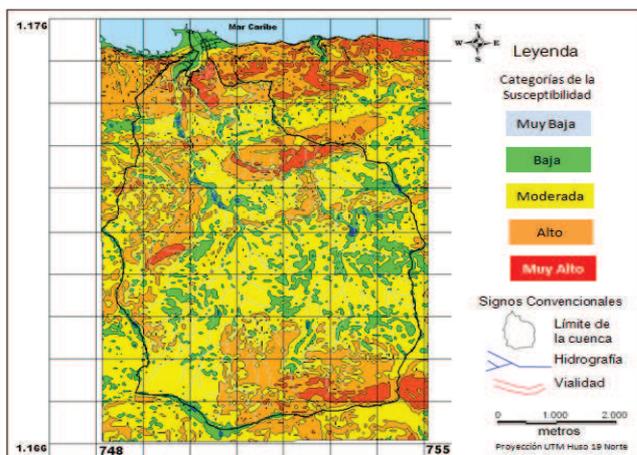


Figura 10. Mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Camurí Grande.

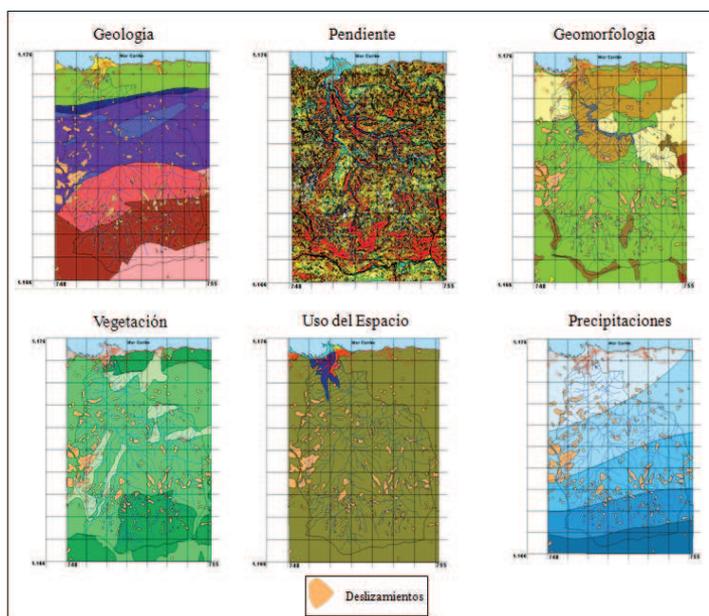


Figura 11. Mapas de variables consideradas en el mapa de susceptibilidad y el de precipitaciones, con un mapa de deslizamientos superpuesto, representando un evento acaecido, de lluvias extremas en diciembre de 1999.

Cuadro 10. Deslizamientos ocurridos en 1999, sobrepuestos en el mapa de susceptibilidad, para establecer mediciones

Categorías de la susceptibilidad	Km ²	% del área	Total deslizado	% Deslizado
Muy baja	0,50	0,7	0,024	0,5
Baja	9,00	13,1	0,697	15,1
Moderada	36,00	53,2	2,489	54,0
Alto	18,00	27,0	1,205	26,1
Muy alto	4,00	6,0	0,195	4,3
Totales	67,50	100	4,610	100

Se considera importante mostrar los cálculos de calibración de este modelo, para validarlo de acuerdo a lo reportado en el cuadro 11. Se puede estimar que en un 70% aproximadamente el modelo de susceptibilidad se considera válido. Tiene un alto porcentaje de confianza lo que se consideró susceptible, en balance con un evento ocurrido de lluvias extremas, puesto que la mayor cantidad de deslizamientos se generaron entre las zonas de moderada y alta susceptibilidad; se puede validar entonces el modelo para el cruce con los detonantes de precipitaciones y sísmico, que generan la amenaza.

Modelos de Amenaza

Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa por el desencadenante precipitaciones.

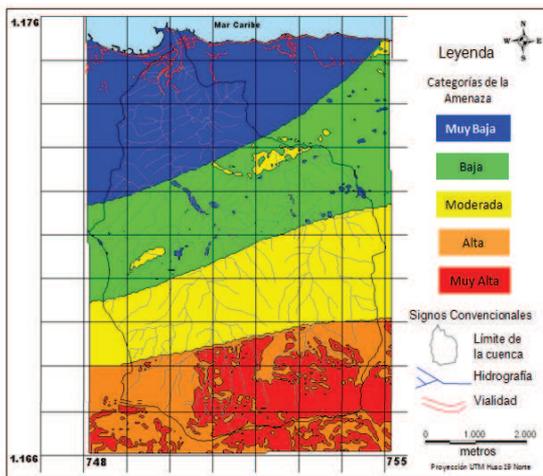


Figura 11. Mapas de amenaza por procesos de remoción en masa, por el desencadenante de precipitaciones en la cuenca del río Camurí Grande.

Mapa de amenaza por procesos de remoción en masa por el desencadenante sísmico.

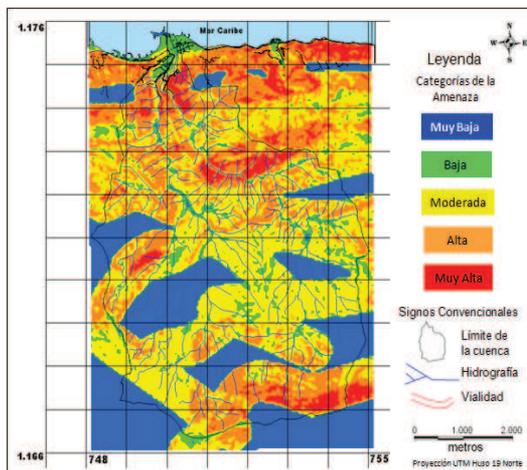


Figura 12. Mapas de amenaza por procesos de remoción en masa, por el desencadenante sísmico en la cuenca del río Camurí Grande.

CONCLUSIONES

En la cuenca del río Camurí Grande, se puede ver reflejada una importante problemática del país, relacionada con el hábitat, la calidad de vida y el riesgo en que vive un gran porcentaje de la población, ante la ocurrencia de fenómenos naturales relacionados con las fuertes precipitaciones y sismos de magnitud considerable.

La metodología de la evaluación espacial multicriterio, puede ser considerada como muy conveniente y estratégica para el manejo de una inmensa cantidad de datos, informaciones y variables para la generación de estos mapas de amenaza. En efecto, con la evaluación espacial multicriterio se pueden considerar muchos aspectos físico-naturales y antrópicos que intervienen en la generación de procesos de remoción en masa, pero la investigación también va a depender de la información disponible y la cartografía temática que se pueda lograr obtener o construir, eso puede representar una limitación, incluso tratándose del Estado Vargas donde se decidió trabajar, a pesar de que a raíz de la llamada tragedia de Vargas, las instituciones y muchos científicos se han dedicado al levantamiento de información importante. Aún faltan por determinar, por ejemplo, la humedad del suelo y la microzonificación sísmica, aspectos que son fundamentales.

Para la determinación de los pesos ponderados dados tanto a los atributos de las variables, como a las propias variables para la superposición de mapas, es necesario considerar varias técnicas, que pueden convenir de acuerdo a la variable o a las características del área de estudio, se puede hacer consulta a expertos mediante la matriz de jerarquización analítica, para tener mayor efectividad y confiabilidad en los resultados, o confiar en una exhaustiva revisión teórica que pueda ajustarse a la realidad, sobre el comportamiento de las variables ante determinadas condiciones, todo ello requiere de una planificación.

Para el modelo se consideraron un total de siete (7) variables, cinco (5) de ellas para generar el mapa de susceptibilidad (geología, pendiente del

terreno, geomorfología, vegetación y conflicto de uso del espacio), éste se ajustó a la realidad en más de un 70% aproximadamente, calibrándolo con el evento de lluvias torrenciales ocurridas en diciembre de 1999, por lo que se consideró válido para cruzarlo con las dos variables desencadenantes, las precipitaciones y la sísmica. De ello se evidenció que el asiento poblacional que existe en la cuenca, puede ser gravemente afectado de ocurrir alguno de estos fenómenos geológicos o hidrológicos, por lo que se recomienda, a los organismos competentes, tomar en cuenta esta herramienta de pronóstico, considerar las medidas necesarias, y orientar acciones de prevención para que el riesgo pueda ser mitigado.

REFERENCIAS

- Ávila, H. (2006). Introducción a la metodología de la investigación. (Libro en línea). Disponible en: <http://www.eumed.net/libros/2006c/203/2i.htm>. [Consulta: 2008, enero 23]
- De Cos Guerra, O. (2007). SIG y evaluación multicriterio: propuesta metodológica para cuantificar el grado de metropolización en el territorio. *Mapping Interactivo Revista Internacional de Ciencias de la Tierra* [Revista en línea]. N° 116. Disponible en: http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1371 [Consulta: 2010, enero 28]
- Gómez, M. y Barredo, J. (2005) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: Ra-Ma (H. Pacheco, entrevista personal, Abril 09, 2010).
- LANDSAT TM+ de abril de 2000. Imagen de satélite
- Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional (2000). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 37.002. Julio 28, 2000
- MapInfo Corporation (2003). *MapInfo Professional Guía del usuario*. (Versión completa). Troy, Nueva York
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección de Cartografía Nacional. (1975). Mapas Topográficos. Hojas 6847-I-SO de Carupano y 6847-I-NO de Naguayá, Venezuela
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del Cantón San José, Provincia de San José, Costa Rica. (Artículo en

- Línea) Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, Escuela Centroamericana de Geología y Universidad de Costa Rica. Disponible en: http://www.femica.org/areas/modambiental/archivos/foro/deslizamiento_canton_san_jose.pdf. [Consulta: 2009, Junio 15]
- Mora, R., Chavez, J., y Vásquez, M. (2002). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados Obtenidos para la península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson. III Curso Internacional sobre microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres. [En Línea]. San José, Universidad de Costa Rica. Disponible en: <<http://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc15359/doc15359-a.pdf>>. [Consulta: 15 junio 2009]
- Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar - Ministerio de Ambiente y los Recursos Naturales "Productor". (2003). Proyecto Ávila. [Multimedia CD – Rom]. Caracas: Corporación Andina de Fomento
- Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso del Área de Protección y Recuperación Ambiental del Estado Vargas (eje Arrecife-Los Caracas). (DECRETO N° 3.413). (2005, enero 11). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.758 Extraordinario. Enero 27, 2005
- Rivera, H. (s/f). Los movimientos masales. [Artículo en línea]. La Web de la bioingeniería y la restauración ecológica. Cali, Colombia. Disponible en: <http://ecoambientes.tripod.com/id9.html>. [Consulta: 2010, febrero 15]
- Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes de satélites: Cuenca del río Mocoties, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), pp. 183-219
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hieracchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1). pp. 83-98
- Salazar, L. (2007). Modelaje de la Amenaza al Deslizamiento Mediante el Sistema de Información Geográfico – ILWIS-, Utilizando el Método Mora Vahrson, 1991. (Artículo en línea). Disponible en: <http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/Br07/Comunicaciones/Salazar.pdf> [Consulta: 2008, enero 7]
- (S. Cartaya, carta, mayo 04, 2009)
- Soldano, A. (2008). Conceptos sobre riesgo. Síntesis temática realizada para el foro virtual de la RIMD creado para la capacitación en

teledetección aplicada a la reducción del riesgo por inundaciones” (Provincia de Córdoba, Argentina, 16 al 20 marzo 2009)
Universidad Central de Venezuela y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. (2001) Mapa geológico del sector de Naiguatá. Edición 1, hoja 6847-I-NO, escala 1:25.000
Zambrano, A. (1970). Estudio Fisiográfico y Regional de la “Cuenca del Tuy”. *Boletín de Geología*, 11(21), 5-203